

**ПРАВИТЕЛЬСТВО РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНОМИКИ»  
МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ**

# **ЭЛЕКТРОНИКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ**

**Лабораторные работы и упражнения**

**Под редакцией доктора технических наук  
К. О. Петросянца**

**Москва  
СОЛОН-Пресс  
2017**

УДК 621.382

П29

Авторы:

К. О. Петросянц, П. А. Козынка, Н. И. Рябов,  
Л. М. Самбурский, И. А. Харитонов

Под редакцией д-ра техн. наук, проф. К. О. Петросянца

Рецензенты:

М. А. Королёв – д-р техн. наук, профессор кафедры интегральной электроники и микросистем Национального исследовательского университета «Московский институт электронной техники»;  
В.С. Першенков – д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой микроэлектроники Национального исследовательского ядерного университета «Московский инженерно-физический институт».

**П29**      **Электроника интегральных схем. Лабораторные работы и упражнения.** Учебное пособие под редакцией д-ра техн. наук К. О. Петросянца. – М: СОЛОН-Пресс, 2017. – 556 с.

Рассмотрены принципы работы и электрические характеристики биполярных и МОП-транзисторов интегральных схем, базовых элементов цифровой и аналоговой схемотехники, БМК и ПЛМ, микроконтроллеров и микропроцессоров. Описаны методики выполнения лабораторных, расчетных на ЭВМ, курсовых, самостоятельных и др. работ. Пособие предназначено для бакалавров и магистров различных специальностей, изучающих электронику, микроэлектронику и схемотехнику; отдельные разделы могут быть полезными для аспирантов и инженеров-практиков.

УДК 621.382

ISBN 978-5-91359-213-2    © СОЛОН-Пресс, 2017

© НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ «ВЫСШАЯ ШКОЛА ЭКОНО-  
МИКИ» (МОСКОВСКИЙ ИНСТИТУТ ЭЛЕК-  
ТРОНИКИ И МАТЕМАТИКИ), МОСКВА, 2017

# ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Предисловие</b>	<b>5</b>
<b>Глава I. Полупроводниковые приборы</b>	<b>9</b>
1.1. Изучение статических характеристик биполярного транзистора и определение основных параметров его модели для расчёта схем .....	9
1.2. Определение параметров моделей биполярных транзисторов .....	34
1.3. Изучение статических характеристик МОП-транзистора и определение основных параметров его модели для расчёта схем .....	59
1.4. Определение параметров моделей МОП транзисторов.....	81
<b>Глава II. Аналоговые электронные схемы</b>	<b>101</b>
2.1. Усилитель с общим эмиттером .....	101
2.2. Электронные устройства на операционных усилителях .....	119
2.3. Изучение диодного и транзисторного стабилизаторов напряжения.	158
2.4. Изучение схемы генератора линейно изменяющегося напряжения (ГЛИН).....	166
2.5. Проектирование аналоговой схемы на основе БМК «ФАРХАД-2».....	174
<b>Глава III. Цифровые электронные схемы</b>	<b>190</b>
3.1. Изучение схемы ключа на биполярном транзисторе .....	190
3.2. Изучение статических и динамических характеристик транзисторно-транзисторных логических интегральных схем (ТТЛ) .....	206
3.3. Изучение статических и динамических характеристик логических интегральных схем на комплементарных МОП-транзисторах (КМОП) .....	226

3.4. Моделирование логических вентилях	244
3.5. Моделирование работы триггеров	270
3.6. Моделирование работы регистров и счётчиков	287
3.7. Моделирование работы ОЗУ	305
3.8. Моделирование работы АЛУ	338
3.9. Проектирование логической схемы на основе БМК «МЕЛИССА»	359
<b>Глава IV. Микроконтроллеры</b>	<b>396</b>
4.1. Краткие теоретические сведения	396
4.2. Изучение архитектуры микроконтроллера MC68HC908QT4	419
4.3. Блок АЦП микроконтроллера MC68HC908QT4	425
4.4. Модуль времени и порты ввода/вывода микроконтроллера MC68HC908QT4	429
<b>Глава V. Тестирование цифровых устройств. Язык описания аппаратуры VHDL</b>	<b>435</b>
5.1. Логическое моделирование и разработка тестов для цифровых устройств	435
5.2. Язык описания аппаратуры VHDL	466
5.3. Разработка модели калькулятора на ПЛИС Xilinx	532

# ПРЕДИСЛОВИЕ

За прошедшее десятилетие опубликовано достаточное количество отечественной и переведенной на русский язык зарубежной учебной литературы, посвящённой микроэлектронным полупроводниковым приборам и схемам. Описаны их типовые конструкции, принцип работы, характеристики и области применения. Однако, практические вопросы измерения и исследования характеристик полупроводниковых приборов и схем, определения параметров их моделей для схемотехнического проектирования, верификации и тестирования, являющиеся ключевыми для разработчиков электронной аппаратуры, рассмотрены недостаточно.

Этот пробел в значительной степени устранён в настоящем учебно-методическом пособии–практикуме **«Электроника интегральных схем. Лабораторные работы и упражнения»**.

Достоинством практикума является то, что он ориентирован на все уровни обучающихся: бакалавров, специалистов, магистрантов, аспирантов, а также может быть полезен практическим инженерам, повышающим свою квалификацию.

Практикум состоит из пяти глав.

Первая глава посвящена основным приборам современных полупроводниковых интегральных схем: биполярным и МОП-транзисторам. Кратко объясняется принцип их работы, описываются базовые физические структуры и конструкции, электрические характеристики и параметры. Основное внимание уделено вопросам выполнения лабораторных и др. практических работ по измерению и исследованию характеристик и параметров транзисторов с помощью современного измерительного оборудования. Впервые для отечественных вузов, ведущих подготовку инженеров–электронщиков, по настоятельному требованию предприятий–работодателей в практикум были добавлены два чрезвычайно важных нововведения: 1. Определение (экстракция) SPICE-параметров моделей транзисторов из результатов измерения их характеристик; 2. Приобретение практических навыков работы не только с традиционными кремниевыми биполярными и МОП-транзисто-

рами, но и с их наиболее перспективными разновидностями на основе кремний–германия и структур «кремний на изоляторе». В результате, за прошедшее десятилетие удалось подготовить поколение инженеров с резко возросшим уровнем теоретической и практической подготовки в области разработки и проектирования интегральных схем. Разработанная методика подготовки даёт хорошие результаты и весьма востребована по настоящее время.

Вторая и третья главы посвящены практическому исследованию режимов работы и основных характеристик и параметров типовых аналоговых и цифровых фрагментов современных биполярных и КМОП-интегральных схем. Преимуществом данных глав, по сравнению с материалами, изложенными в методических пособиях других вузов, является наличие разделов, посвящённых практическим аспектам проектирования аналоговых (Глава 2) и цифровых (Глава 3) устройств на основе отечественных базовых матричных кристаллов (БМК). В начале 2000-х годов и по настоящее время этот подход был и остаётся перспективным направлением разработки электронной аппаратуры и, как следствие, широко используется предприятиями. Следует отметить, что сегодня создание электронной аппаратуры на основе отечественных БМК является одним из элементов стратегии импортозамещения в российской электронике. Настоящий практикум призван явиться важной вехой в системе подготовки инженерных кадров для решения этой задачи.

В четвёртой главе представлен комплекс лабораторных работ по изучению характеристик и приобретению практических навыков работы с БИС микроконтроллеров, которые получили очень широкое распространение в современной аппаратуре, предназначенной для измерения, контроля, управления объектами различного назначения.

Пятая глава посвящена чрезвычайно важному вопросу – тестированию цифровых микросхем. Именно результаты верификации и тестирования в конечном итоге определяют работоспособность микросхем и их пригодность для практического использования в аппаратуре. В отечественных вузовских практикумах по приборам и интегральным схемам этот вопрос ранее не рассматривался. Включение его в практикум было продиктовано настоятельными требованиями промышленности. В процессе выполнения лабораторных и курсовых работ студенты изучают модели логических элементов и цифровых устройств, виды неисправностей, алгоритмы тестирования, а также при-

обретают практические навыки построения тестов, оценки их полноты, поиска неисправностей с помощью логического моделирования и средств САПР. В этой же главе приведён комплекс лабораторных работ по изучению и освоению языка описания аппаратуры VHDL. Приведены методические указания по разработке моделей цифровых устройств на программируемых логических матрицах (ПЛМ) фирмы Xilinx – мирового лидера в этом виде электронных компонентов. Как финишный этап приведена лабораторная работа «Построение модели калькулятора на языке VHDL на элементной базе ПЛМ Xilinx». Таким образом, студенты и практические инженеры приобретают навыки построения сложной аппаратуры на основе цифровых микросхем различных видов и конструктивного воплощения.

Материал, представленный в практикуме, был использован авторами в МИЭМ с 2005 по 2012 г.г. и в МИЭМ НИУ ВШЭ с 2012 по 2016 г.г. в процессе преподавания следующих дисциплин: электроника (на русском и английском языках), микросхемотехника, проектирование цифровых устройств, элементная база персональных ЭВМ и компьютерное моделирование устройств микроэлектроники и ряда других электронных дисциплин для обучения студентов по направлениям подготовки 210100 «Электроника и наноэлектроника», 210000 «Электроника, радиоэлектроника и связь», 230100 «Информатика и вычислительная техника», а также ряда смежных направлений: 100501 «Компьютерная безопасность», 200501 «Метрология и метрологическое обеспечение», 210700 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 220100 «Вычислительные машины, комплексы, системы и сети», 220300 «САПР», 220201 «Управление и информатика в технических системах», 220501 «Управление качеством».

Отдельные разделы и методики практикума использовались также для подготовки инженеров-электронщиков в ряде других российских технических университетов.

Опираясь на десятилетний опыт использования учебно-методических разработок, изложенных в настоящем практикуме, для подготовки инженеров-электронщиков различного профиля, авторы могут заключить, что он оказался безусловно полезным по следующим причинам: во-первых, он удовлетворяет требованиям работодателей в части усиления практической подготовки выпускников с целью резкого сокращения сроков их адаптации на

будущем месте работы; во-вторых, соответствует тенденции российского и мирового технического образования в части увеличения доли практических и самостоятельных занятий; в-третьих, широко использует методы математического моделирования и САПР в сочетании с методами измерения и исследования характеристик полупроводниковых приборов и схем с помощью современных измерительных устройств и систем, что отвечает передовому мировому уровню подготовки специалистов в области электроники, микро- и наноэлектроники, а также связанных с ними смежных областей.

Распределение авторского участия при написании пособия сложилось следующим образом. Главы 1 – 3 написаны совместно Петросянцем К. О., Рябовым Н. И., Самбурским Л. М., Харитоновым И. А.; глава 4 написана Рябовым Н. И.; глава 5 написана Козынко П. А. Общее редактирование пособия выполнено д. т. н., проф. Петросянцем К. О.

Авторы признательны сотрудникам кафедры «Электроники и наноэлектроники» МИЭМ, принимавшим участие в подготовке и написании материалов для пособия: Гоманиловой Н. Б. (§5.1), Торговникову Р. А. (§§1.2, 2.5), Стародубову А. Ю (§§3.4–3.7), Ушакову В. Н. (§2.2).

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам учебного пособия: проф., д.т.н. Королеву М. А. (НИУ МИЭТ) и проф., д. т. н., Першенкову В.С. (НИЯУ МИФИ) за высказанные замечания, которые были учтены в окончательной редакции книги и способствовали улучшению её содержания.



**К. О. Петросянц, П. А. Козылко, Н. И. Рябов,  
Л. М. Самбурский, И. А. Харитонов**

**ЭЛЕКТРОНИКА ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ.  
ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ И УПРАЖНЕНИЯ**

**Учебное пособие под редакцией д-ра техн. наук.  
К. О. Петросянца**

Ответственный за выпуск: **В. Митин**  
Макет, вертка, обложка: **СОЛОН-Пресс**

**ООО «СОЛОН-Пресс»**  
123001, г. Москва, а/я 82  
Телефоны: (495) 617-39-64, 617-39-65  
E-Mail: [avtor@solon-press.ru](mailto:avtor@solon-press.ru),  
[www.solon-press.ru](http://www.solon-press.ru)

По вопросам приобретения обращаться:  
**ООО «ПЛАНЕТА АЛЬЯНС»**  
Тел: (499) 782-38-89, [www.aliants-kniga.ru](http://www.aliants-kniga.ru)

**ООО «СОЛОН-Пресс»**  
115142, г. Москва, Кавказский бульвар, д. 50  
Формат 60×88/16. Объем 32,5 п. л. Тираж 1000 экз.